

ผลกระทบของฝนต่อพฤติกรรมของดิน : การประเมินความเสี่ยงดินถล่ม ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

ลัดดาวัลย์ ดุลย์^{1*} ทวีชัย ยี่เมา² ศุภกฤต กันทาคำ³

^{1*,2,3}สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ : laddawon_dul@rmutl.ac.th

รับต้นฉบับ : 13 มกราคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข : 7 พฤษภาคม 2568; ตอบรับบทความ : 27 พฤษภาคม 2568

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ดินถล่มถือเป็นหนึ่งในภัยพิบัติทางธรณีวิทยาที่สร้างความเสียหายรุนแรงในพื้นที่ภูเขา ซึ่งมักมีปัจจัยเสี่ยงจากปริมาณน้ำฝน คุณสมบัติของดินและการตัดถนนผ่านในพื้นที่เขาสูง จึงทำการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของดินภายใต้เงื่อนไขฝนตกต่อเนื่องในพื้นที่เสี่ยง บริเวณทางหลวงหมายเลข 1096 อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้การจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของมวลดิน 2 ประเภท ได้แก่ มวลดินเดิมบริเวณข้างทาง มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m^3 และมวลดินบดอัดที่เป็นไหล่ทาง มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m^3 ภายใต้ปริมาณน้ำฝน 4 ระดับ ผลการทดลองพบว่า มวลดินเดิมเกิดการถล่มเมื่อมีฝนตกที่อัตรา 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ขณะที่มวลดินบดอัดไหล่ทางถล่มเมื่อปริมาณฝนถึง 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยค่าดัชนีอัตราการถล่มต่อปริมาณน้ำฝนที่ 0.75 เป็นจุดขีดจำกัดเริ่มเกิดการถล่มอย่างต่อเนื่องในมวลดินเดิม และเกิดการถล่มแบบเฉียบพลันในมวลดินบดอัดเมื่อฝนเกิน 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จากผลการศึกษาได้เสนอใช้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนร่วมกับดัชนีอัตราการถล่มเป็นเครื่องมือเตือนภัยเบื้องต้น โดยกำหนดระดับเตือนภัยสีเหลือง ที่ช่วง 60–160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ที่ควรเริ่มเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของดิน ระดับสีเหลืองเข้มเพื่อเตรียมการอพยพ และระดับสีแดงควรปิดถนนเมื่อฝนตกเกิน 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ ยังสามารถจำแนกพฤติกรรมการถล่มได้ 4 ลักษณะ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการวางแผนป้องกันและบริหารจัดการความเสี่ยงในพื้นที่เสี่ยงดินถล่มอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ดัชนีเตือนภัยล่วงหน้า ดินถล่ม แบบจำลองทางกายภาพ ปริมาณน้ำฝน เสถียรภาพของลาดชันของดิน

Rainfall Impact on Soil Behavior: Landslide Risk Assessment Using Physical Modeling

Laddawon Dul^{1*} Taweechai Yeemao² Suphakrit Kantakam³

^{1*,2,3}*Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: laddawon_dul@rmutl.ac.th

Received: 3 January 2025; Revised: 7 May 2025; Accepted: 27 May 2025

Published online: 26 December 2025

Abstract

Landslides are recognized as major geological hazards that can cause significant damage in mountainous areas, where risk factors often include high rainfall, specific soil characteristics, and road construction across elevated terrain. This study considers to analyze soil behavior under continuous rainfall conditions in a high-risk area along Highway No. 1096, Samoeng District, Chiang Mai Province, using physical modeling in a laboratory setting. Two types of soil masses were examined: natural roadside soil with a unit weight of 15.30 kN/m³ and compacted shoulder soil with a unit weight of 18.34 kN/m³, tested under four rainfall intensity levels. The results revealed that the natural soil mass collapsed when rainfall reached 60 mm/hr, while the compacted shoulder soil failed at 160 mm/hr. A landslide intensity index of 0.75 was identified as a critical threshold, marking the onset of continuous failures in natural soil and sudden failure in compacted soil when rainfall exceeded 220 mm/hr. Based on these findings, the study proposes a preliminary warning system using both rainfall thresholds and the landslide intensity index. A Yellow Alert level 60–160 mm/hr is recommended for initial monitoring of soil movement, Dark Yellow for evacuation preparedness, and Orange Alert for road closure when rainfall exceeds 220 mm/hr. Additionally, four distinct types of landslide behavior were identified, providing valuable insights for future prevention and risk management planning in landslide-prone areas.

Keywords: Early warning index, Landslide, Physical modeling, Rainfall, Slope Stability of Soil

1) บทนำ

ปัญหาดินถล่มเป็นภัยพิบัติที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม [1] ในพื้นที่ที่มีภูมิประเทศลาดชันซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยได้แก่ การตัดไม้ทำลายป่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่มีภูมิประเทศไม่เหมาะสม โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีเนินเขาหรือภูเขาที่ลาดชัน รวมถึงฝนตกหนักที่เกิดขึ้นบ่อยในบางพื้นที่ [2] เช่น ในปี ค.ศ. 2014 มีเหตุการณ์ดินถล่มในรัฐอูซิงตันที่เกิดจากฝนตกหนักและโครงสร้างดินที่ไม่เสถียรทำให้มีผู้เสียชีวิต 43 ราย [3] ในปี ค.ศ. 2017 เมืองโมโกอา ประเทศโคลอมเบีย เกิดเหตุดินถล่มจากฝนตกหนัก มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 300 ราย [4] และจังหวัดชาวตะวันตก ประเทศอินโดนีเซียทำให้มีผู้เสียชีวิตหลายสิบคนเมื่อปี ค.ศ. 2021 [5] ซึ่งในบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย มักพบกับเหตุการณ์ดินถล่มบ่อยครั้งบริเวณเส้นทางคมนาคมตัดผ่านระหว่างอำเภอ เนื่องจากภูมิประเทศที่มีภูเขาสูงชันและมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อเชื่อมระหว่างอำเภอ โดยตัดถนนบนภูเขา ภายได้เงื่อนไขที่จำกัดทางวิศวกรรม [6] ทำให้เมื่อมีฝนตกปริมาณมากจึงเกิดดินถล่มปิดทับเส้นทางเกิดความเสียหายอย่างมากต่อชีวิตและทรัพย์สิน การจราจร และสิ่งมีชีวิต [7] โดยเฉพาะเหตุการณ์ดินถล่มในบริเวณเส้นทางหลักในการเดินทางจากอำเภอแม่ริม เข้าสู่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ มักเกิดดินถล่มซ้ำ ๆ ทุกปี เช่น วันที่ 24 กันยายน ค.ศ. 2024 เกิดดินถล่มปิดเส้นทางสายกองขาหลวง - สะเมิงได้บริเวณดอยยาว [8] วันที่ 13 และ 25 กันยายน ค.ศ. 2022 ในพื้นที่ตำบลสะเมิงได้มีฝนตกสะสมทำให้เกิดดินถล่มปิดทางหลวงหมายเลข 1096 ช่วง กม. ที่ 24-25 ดังรูปที่ 1 [9], [10] ซ้ำกันในระยะเวลา 2 สัปดาห์ เจ้าหน้าที่ต้องใช้เครื่องจักรในการเปิดเส้นทางและตรวจสอบความปลอดภัย จะเห็นว่าดินถล่มมักเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝนซึ่งมีปัจจัยเร่งสำคัญ คือปริมาณน้ำฝนที่ตกหนักเป็นระยะเวลานาน จนกระทั่งมวลดินอิ่มน้ำจนกระทั่งมีฝนตกหนักจนดินไม่สามารถสามารถอุ้มน้ำไว้ได้

ปัจจุบันหน่วยงานรัฐท้องถิ่นจะการใช้การเก็บสถิติความสัมพัทธ์เหตุการณ์ดินถล่มและปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวันในรอบ 30 ปี ตามค่ามาตรฐานภูมิอากาศในการแจ้งเตือนพื้นที่ที่จะเกิดดินถล่มในระดับอำเภอ ซึ่งบางครั้งในพื้นที่การเกิดดินถล่มยังมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ความลาดชัน การระบายน้ำ คุณสมบัติของดิน การรบกวนเสถียรภาพจากการตัดถนน เป็นต้น [11]

จากปัญหาดินถล่มทำให้ต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสม การใช้เทคโนโลยีและมาตรการเชิงป้องกันมีบทบาทสำคัญในการลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงและมีโครงสร้างธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน แนวทางการประเมินความเสี่ยงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แบบจำลองเชิงระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS-based models) และแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยง [12] การใช้แบบจำลอง 3 มิติ (3D Seepage Modeling) ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเสถียรภาพของลาดดินในบริเวณที่มีสภาพไม่เอื้ออำนวย วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในดินและผลกระทบต่อค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FoS.) อันเนื่องมาจากฝนตก [13] หรือระบบเตือนภัยโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนตัวของดิน [14] ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเกณฑ์ปริมาณฝนที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินเพื่อพัฒนาเกณฑ์เตือนภัยดินถล่มทั้งการใช้แบบจำลองทางกายภาพในการสังเกตและวิเคราะห์พฤติกรรมของดินในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ [15]

การศึกษามลกระทบของปริมาณน้ำฝนในการเกิดดินถล่มด้วยแบบจำลองทางกายภาพ ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของมวลดินและพัฒนาระบบเตือนภัยในพื้นที่มีถนนตัดผ่านบนภูเขาลาดชันที่ไม่สามารถออกแบบให้เหมาะสมต่อเสถียรภาพได้ ซึ่งกรณีศึกษาอยู่ที่เส้นทางหลวงหมายเลข 1096 เชียงใหม่-สะเมิง จะช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ในบริบทของแนวทางพัฒนาการป้องกันและระบบเตือนภัยล่วงหน้าเพื่อลดความเสียหายในอนาคต



รูปที่ 1 : เหตุการณ์เกิดดินถล่มบริเวณเส้นทางหลวงหมายเลข 1096
เชียงใหม่ - สะเมิง [9]

2) ทบทวนวรรณกรรม

2.1) การศึกษาแบบจำลองพยากรณ์ดินถล่ม

การศึกษาแบบจำลองดินถล่มทางกายภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยปริมาณน้ำฝนและพฤติกรรมการเกิดดินถล่มเพื่อสร้างดัชนีการเตือนภัย ให้เฝ้าระวังความเสี่ยง สำหรับการเตรียมความพร้อมต่อเหตุการณ์ดินถล่มเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมถึงหาแนวทางการป้องกัน โดยส่วนใหญ่มักจะใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์วิเคราะห์หาผลกระทบต่อค่าความปลอดภัย [13] โดยใช้หลักฟิสิกส์ในการจำลองตัวเลขที่พิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ด้านธรณีเทคนิค เช่น ความแข็งแรงเฉือน ความชื้น แรงดันน้ำ แบบจำลองส่วนใหญ่จะใช้วิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method: LEM) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ซึ่งช่วยให้สามารถคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย และระบุตำแหน่งแนวการถล่มได้ [16] ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุการถล่มได้อย่างละเอียด หากแต่มีข้อจำกัดทางด้านความแม่นยำของข้อมูลทางธรณีเทคนิคและใช้ทรัพยากรในการประมวลผลสูง หรือการใช้แบบจำลอง GIS สามารถนำมาสร้างแผนที่ความไวต่อการเกิดดินถล่ม โดยผสมผสานข้อมูลเชิงพื้นที่ เช่น ความชื้น ธรณีวิทยา ปริมาณน้ำฝน และการใช้ที่ดิน แบบจำลอง GIS มีหลายวิธี เช่น แบบจำลองเชิงผู้เชี่ยวชาญ (heuristic models) แบบจำลองเชิงสถิติ (statistical models) และแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning models) [17] ซึ่งสามารถวิเคราะห์พื้นที่ขนาดใหญ่ได้ ซึ่งเหมาะกับการประเมินในพื้นที่ขนาดใหญ่และยากต่อการเข้าถึง หากยังไม่สามารถใช้ในการพยากรณ์เวลาหรือขนาดของดินถล่มได้โดยตรง ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลและความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้

แบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในภาคสนามรวมถึงการตรวจวัดพื้นที่เสี่ยงดินถล่ม เช่น การติดตั้งระบบเตือนภัยโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนตัวของดิน เพื่อติดตามพฤติกรรมและปัจจัยแวดล้อมภาคสนาม [14] หรือการการกระตุ้นดินถล่มโดยควบคุมปริมาณน้ำฝน [18] สามารถควบคุมตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้ดี ทำให้เข้าใจกลไกของดินถล่มได้ละเอียด แต่การสร้างอุปกรณ์และการดำเนินการมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงความปลอดภัยในการดำเนินงานที่บริเวณพื้นที่ศึกษาค่อนข้างใช้เวลาในการศึกษาและเก็บข้อมูล การทดลองซ้ำทำได้ยากเนื่องจากได้รับผลกระทบจากตัวแปรที่เป็นสิ่งแวดล้อมรวมถึงมีพื้นที่ขนาดใหญ่อีกด้วย

ในการจำลองในห้องปฏิบัติการนั้นจะสามารถควบคุมตัวแปรได้ดี โดยเฉพาะสภาวะแวดล้อมที่คงที่ที่สามารถศึกษาสาเหตุและผลกระทบของดินถล่มที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน ในรูปแบบของการทดลองในห้องปฏิบัติการที่เขต Hongkou ของเมือง Dujiangyan ประเทศจีน ได้จำลองจากพื้นที่ที่เกิดดินถล่มที่มีความชัน 28–40 องศา มีความกว้าง 416 เมตร ความยาว 190–260 เมตร ความลึก 4–10 เมตร ใช้มาตราส่วน 1:200 สำหรับความกว้างและความยาว และ 1:50 สำหรับความลึก ใช้ระบบจำลองฝนที่สามารถปรับความเข้มข้นได้และติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดค่าทางกายภาพ ผลจากการจำลองการถล่มของดินพบว่าในช่วงปริมาณน้ำฝน 30–60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แบบจำลองเกิดดินถล่มที่บริเวณส่วนปลายของดินลาดชัน และเมื่อมีฝนตกต่อเนื่องจะไม่เกิดการพังทลาย กระบวนการนี้เรียกว่า “Slow Retrogressive Toe Sliding” ช่วงที่ปริมาณน้ำฝน 90–150 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ส่วนที่ทรุดตัวลงที่ด้านล่างดินลาดชันจะค่อย ๆ กระจายตัวไปถึงตรงกลาง จนทำให้เกิดความสมดุลใหม่ กระบวนการนี้เรียกว่า “Multiple Retrogressive Toe Sliding” ช่วงที่ปริมาณน้ำฝน 180 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ขึ้นไปแบบจำลองลาดชันส่วนใหญ่จะเกิดการถล่มอย่างรวดเร็ว และส่วนที่เหลืออยู่จะถูกชะล้างโดยฝนที่ตกหนัก กระบวนการนี้เรียกว่า “Suddenly Diffusive Flow Sliding As a Whole” [15]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในใช้แบบจำลองทางกายภาพเช่นเดียวกันเพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินภายใต้ปริมาณน้ำฝนความเข้มข้น 4 ระดับที่ได้จากการเก็บสถิติในพื้นที่ย้อนหลัง 5 ปีและประเมินความเสี่ยงของดินถล่มบริเวณดินเดิมข้างทางที่ถูกตัดถนนผ่านและดินที่ถูกบดอัดเพื่อทำไหล่ทาง เพื่อสามารถสังเกตการเคลื่อนตัวของมวลดินและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีดัชนีเตือนภัยล่วงหน้าเพื่อพัฒนาวิธีการป้องกันความเสี่ยงบริเวณที่อาจเกิดการถล่มได้

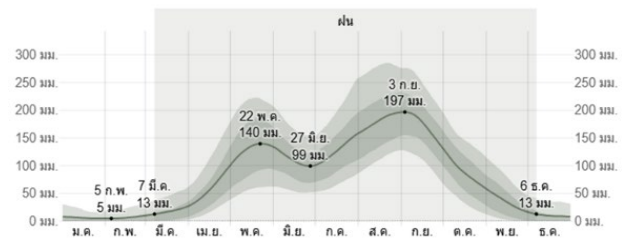
2.2) การศึกษาปริมาณน้ำฝนต่อการเกิดดินถล่ม

ในการศึกษาการเตือนภัยดินถล่มจากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ภูเขาทางภาคเหนือของประเทศไทย ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงประจักษ์จากข้อมูลเหตุการณ์ดินถล่มในอดีตเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสม รายวันหรือรายชั่วโมงกับเหตุการณ์ดินถล่มพบว่า ฝนตกสะสมในช่วง 4 วัน มีความสัมพันธ์กับดินถล่มมากที่สุด โดย 3 วันแรกจะทำให้ดินอิ่มตัว และฝนวันที่ 4 เป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดดินถล่ม นอกจากนี้ยังพบความแตกต่าง

ตามสภาพภูมิประเทศ จึงกำหนดเกณฑ์ฝนวิกฤตเฉพาะแต่ละโซน และพัฒนาเป็นแบบจำลองเตือนภัย เมื่อหากปริมาณฝนสะสมเกินเกณฑ์ก็ถือว่ามีความเสี่ยงสูงและควรแจ้งเตือนทันที [19] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาใช้เกณฑ์ปริมาณฝนเชิงสถิติ เพื่อใช้เป็นแนวทางการเตือนภัยดินถล่มระดับประเทศ โดยพัฒนาจากข้อมูลฝนและเหตุการณ์ดินถล่มจำนวนมากทั่วประเทศนำมาวิเคราะห์ปริมาณฝนที่จะทำให้เกิดดินถล่มได้ [20] รวมถึงการใช้แผนที่พื้นที่เสี่ยงหรือความไวต่อดินถล่ม โดยเป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่แบบสองตัวแปร (bivariate) ในแบบจำลอง GIS คือการรวบรวมแผนที่ปัจจัยต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษาที่คาดว่าจะมีผลต่อดินถล่ม เช่น แผนที่ความชัน แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่การใช้ที่ดิน เป็นต้น ประกอบกับแผนที่ตำแหน่งดินถล่มในอดีต จากนั้นจึงใช้การคำนวณความถี่อัตราการเกิดดินถล่มเพื่อสร้างระดับการเตือนภัยของดินถล่ม [21] อย่างไรก็ตามบริเวณเส้นทางหลวงหมายเลข 1096 เชียงใหม่-สะเมิง มักเกิดการดินถล่มในทุก ๆ ปี และมีการซ่อมแซมและป้องกันจุดที่เกิดเหตุดินถล่มและเฝ้าระวัง แต่ยังคงเกิดการถล่มบริเวณใหม่ตลอดเส้นทาง จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพฤติกรรมมวลดินบริเวณดังกล่าวโดยการใช้แบบจำลองทางกายภาพเพื่อช่วยให้เข้าใจลักษณะพฤติกรรมของดินและการเคลื่อนตัวของดินลาดชันภายใต้ความเข้มข้นของฝนในระดับต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินลาดชัน โดยพิจารณาทั้งปริมาณฝนและมวลดินลาดชัน 2 บริเวณที่มักจะเกิดเหตุการณ์ดินถล่มข้างทางและการหลุดตัวของถนนไหล่ทาง เพื่อเป็นแนวทางการสร้างระบบเตือนภัยในอนาคต

จากสถิติปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 5 ปี ย้อนหลัง ช่วงที่มีฝนชุกของปีมีระยะเวลา 9 เดือน ระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนธันวาคม โดยช่วงที่สามารถวัดปริมาณน้ำฝนได้มากที่สุดของอำเภอสะเมิง คือเดือนสิงหาคม มีปริมาณน้ำฝนสูงสุดที่ 197 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 2 ทำให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำฝนมากที่สุดมี 2 ช่วงเวลาของปี คือระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายนเป็นช่วงเวลาของการสะสมตัวของน้ำในมวลดิน มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จนทำให้เกิดการอิ่มตัวของน้ำในดิน [12] และช่วงระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายนจะเป็นช่วงเวลาที่มักเกิดดินถล่ม เนื่องจากระดับความเข้มข้นน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูมรสุม [22] ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในพื้นที่อยู่ที่ 270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงและต่ำสุดที่ 99 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง [9] เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งว่า เมื่อปริมาณน้ำฝนที่ระดับ 100, 160, 220 และ 270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ลักษณะการเกิดดินถล่มจะทำให้สามารถ

วิเคราะห์และพัฒนาระบบเตือนภัยดินถล่มได้จากแบบจำลองภายใต้ปริมาณน้ำฝนได้



รูปที่ 2 : สถิติปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ. 2519–2023)
พื้นที่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ [19]

2.3) การวิเคราะห์เสถียรภาพและคุณสมบัติของดินลาดชัน

ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่สะเมิงมีความซับซ้อน เนื่องจากมีการแทรกดันตัวของหินแกรนิตหลายครั้ง ทำให้หินเดิมถูกกระบวนการเปลี่ยนลักษณะและการแปรสภาพ หินที่พบในบริเวณนี้ประกอบด้วยหินแปรเกรดสูงที่มีอายุแตกต่างกัน ตั้งแต่ยุคแคมเบรียนถึงออร์โดวิเซียน ดินชั้นบน (Topsoil) มีลักษณะเฉพาะที่สัมพันธ์กับธรณีวิทยาของพื้นที่ จากการศึกษาลักษณะดินในป่าดิบเขาต่ำที่เหลือเป็นหย่อม ดินชั้นบนมีความหนาแน่นรวมต่ำและมีเนื้อหยาบเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนดินชั้นล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วน และร่วนเหนียว อีกทั้งมีรอยเลื่อนมีพลังในพื้นที่สะเมิงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางธรณีวิทยาและสภาพดินในพื้นที่ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลดินและหิน โดยมีปัจจัยลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นบริเวณที่มีหินผุให้ชั้นดินหนา สภาพภูมิประเทศเป็นพื้นที่ภูเขาสูงและมีความลาดชัน ลักษณะสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงจากการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยไม่ถูกหลักวิชาการ เช่นการตัดถนนผ่านภูเขาสูง และปริมาณน้ำฝนที่มากจนชั้นดินอุ้มน้ำไม่ไหว [23]

โดยส่วนใหญ่ดินมีลักษณะการวิบัติแบบรูปโค้ง (circular failure) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยชุดของแผนภูมิ แผนภาพการวิบัติแบบโค้งของลาดดิน (circular failure chart) โดยใช้หาปริมาตรมวลดินถล่ม ใช้จุดศูนย์กลางบนส่วนโค้งของระนาบการวิบัติ (X, Y) ตำแหน่งที่เกิดรอยแตกแบบตึง บริเวณด้านบนของมวลดินลาดชันที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งพิกัด (X, Y) จะวัดโดยมีจุดอ้างอิงอยู่ที่ส่วนล่างสุดของดินลาดชัน และระยะ b ที่เกิดรอยแตกแบบตึง นำมาประมาณการค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (friction angle) [24] และคำนวณปริมาตรของมวลดิน

ที่เกิดถล่ม เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีดัชนีเตือนภัยล่วงหน้า

2.4) การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีการดัชนีเตือนภัยล่วงหน้า

ระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ดินถล่มสามารถจัดจำแนกได้เป็นสองด้านหลัก ๆ ได้แก่ ระยะเวลาของฝนตก และขนาดของพื้นที่ที่เกิดการถล่ม ตัวอย่างเช่น การเกิดมวลดินถล่มที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากจากฝนตกในระยะเวลาสั้น ๆ สามารถอธิบายได้ว่าเป็นเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงค่อนข้างสูง นอกจากนี้ระดับความรุนแรงยังสามารถกำหนดได้โดยการเปรียบเทียบความเสียหายกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสภาพธรณีวิทยาเดียวกันเนื่องจากปริมาณของฝนที่แตกต่างกัน [15]

ระดับความรุนแรงของความเสียหายจากดินถล่มที่เกิดจากปริมาณความเข้มข้นระดับน้ำฝนที่ตกและระยะเวลาของฝนที่ตกลงมา (กล่าวคือเวลาที่ให้เกิดมวลดินถล่ม) จะแทนด้วย de และ T (นาทีก) ตามลำดับ อัตราส่วนของปริมาตรของมวลดินที่ถล่มต่อปริมาตรของแบบจำลองดินลาดชันจะแทนด้วย V และ $|T|$ เป็นค่าที่ไม่มีมิติของ T ตามการร่อนานข้างต้น ยิ่งระยะเวลาฝนตกสั้นและปริมาตรมวลที่ดินถล่มมากขึ้น ความเสียหายจะยิ่งรุนแรงมากขึ้น ดังนั้น de จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V แต่เป็นสัดส่วนผกผันกับ $|T|$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$de = \frac{V}{|T|} \quad (1)$$

โดยที่ V คือ อัตราส่วนของปริมาตรที่พังทลาย

$|T|$ คือ เวลาที่เกิดการพังทลาย

ดังนั้นระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ดินถล่มเนื่องจากปริมาณของฝนที่ I : มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$R = \frac{de_i}{de_{max}} \quad (2)$$

โดยที่ de_i คือ อัตราส่วนของปริมาตรที่มวลดินถล่มต่อเวลาที่เกิดดินถล่ม

de_{max} คือ อัตราส่วนของปริมาตรที่มวลดินถล่มต่อเวลาที่เกิดดินถล่มสูงสุด

ดังนั้น ค่า V , de และ R ที่คำนวณได้ นำไปวิเคราะห์อัตราส่วนดินถล่มเนื่องจากปริมาณของฝนแต่ละระดับ โดยแสดงในตารางที่ 1 [15]

ตารางที่ 1 : ระดับความรุนแรงของดินถล่มเนื่องจากปริมาณฝน

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)		
	i_0	i_1	i_n
V	V'_{i0}/V	V'_{i1}/V	V'_{in}/V
$ T $	$ T _0$	$ T _1$	$ T _n$
de	de_{i0}	de_{i1}	de_{max}
R	R_{i0}	R_{i1}	R_{in}

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) การเก็บข้อมูลพื้นที่เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง

การเก็บข้อมูลจากพื้นที่แขวงทางหลวงเชียงใหม่ 2 ทล.1096 เชียงใหม่-สะเมิง กม. ที่ 24-25 โดยใช้หน่วยน้ำหนักของดินที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม 2 บริเวณ คือ พื้นที่บริเวณดินเดิมข้างทางที่ถูกถนนตัดผ่าน โดยเลือกขึ้นไปเก็บบริเวณด้านบน และดินบดอัดข้างถนนบริเวณไหล่ทาง พื้นที่การศึกษามีลักษณะการออกแบบถนนที่พิจารณาพร้อมกับความลาดเอียงของภูมิประเทศที่มักใช้ในการตัดทางทำถนนบนพื้นที่เข้าสู่ชันทางภาคเหนือ จากการวัดความชันลาดมวลดินเท่ากับ 70 องศา และการออกแบบถนนด้วยวิธี Cut/Fill (พิจารณาร่วมกับสภาพความลาดเอียงของภูมิประเทศ) [25] ดังรูปที่ 3



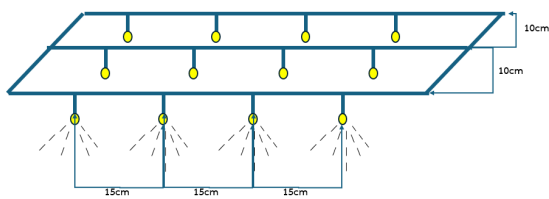
รูปที่ 3 : บริเวณที่เก็บตัวอย่างดิน และเก็บข้อมูลภาคสนาม

ช่วงเวลาเก็บข้อมูลคือเดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2023 ซึ่งเป็นช่วงที่เข้าสู่ฤดูฝน ตัวอย่างดินที่เก็บได้จึงมีความชื้นสูง จากการทดสอบหน่วยน้ำหนักมวลดินเทียบกับ Proctor Test ในห้องปฏิบัติการ พบว่าดินเดิมข้างทางและดินบดอัดไหล่ทางมีค่าเท่ากับ 15.30 kN/m^3 และ 18.34 kN/m^3 ตามลำดับ มีค่าความชื้นของดิน (water Content) ค่าประมาณ 18% เท่ากับค่าความชื้นของ

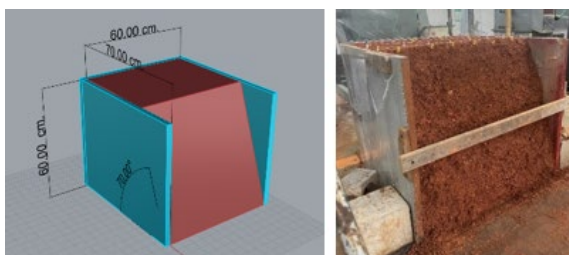
มวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากการทดสอบการบดอัด (compaction test) ในห้องปฏิบัติการ จึงใช้เป็นแบบจำลองมวลดินที่อิ่มน้ำ เพื่อศึกษาดินถล่มภายใต้ฝนตกที่ความเข้มข้นระดับ 4 ระดับ ได้แก่ 100, 160, 220 และ 270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเดือนธันวาคม ถึงเดือนมิถุนายน เป็นช่วงของการสะสมตัวของน้ำในดิน จนทำให้ดินเกิดการอิ่มตัว และการเกิดดินถล่มบริเวณทางหลวงหมายเลข 1096 มักอยู่ในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนมิถุนายน ถึงเดือนพฤศจิกายน โดยเมื่อ กันยายน ค.ศ. 2023 มีปริมาณน้ำฝนต่ำสุดที่ 99 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และสูงสุดที่ 270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

3.2) แบบจำลองทางกายภาพและการควบคุมปริมาณน้ำฝน

พื้นที่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ มีธรณีวิทยาซับซ้อน
ชั้นดินอ่อนและสภาพฝนตกต่อเนื่อง การใช้แบบจำลองกายภาพ
เพื่อให้สามารถจำลองลักษณะภูมิประเทศ หน่วยน้ำหนักมวลดิน
ความชื้น และฝนตกได้ใกล้เคียงกับสภาพในพื้นที่จริง โดยต้องการ
เข้าใจพฤติกรรมของดินลาดชันและลักษณะการเคลื่อนตัวแบบ
real-time เช่น การแตกร้าว ลักษณะดินถล่ม หรือการไหลของ
มวลดิน ซึ่งสามารถเติมเต็มช่องว่างของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่
อาศัยความแม่นยำในการป้อนข้อมูลและการทำนายตำแหน่งที่
เกิดมวลดินถล่ม ซึ่งจะช่วยสร้างระบบเตือนภัยที่เข้าใจง่ายและใช้
งานได้จริง โดยสร้างแบบจำลองขนาดสูง 60 เซนติเมตร ความ
กว้าง 60 เซนติเมตร ความลึก 70 เซนติเมตร มีความชันที่ 70
องศา ดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 : แบบจำลองทางกายภาพและระบบจำลองปริมาณน้ำฝน

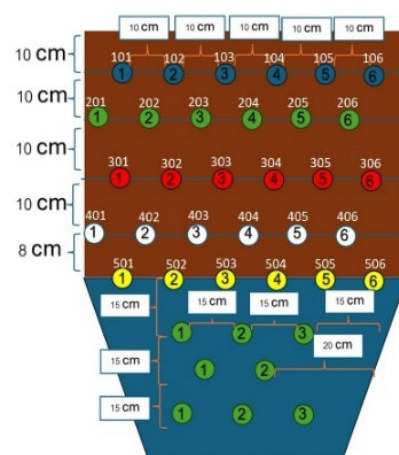


รูปที่ 5 : แบบจำลองทางกายภาพและระบบจำลองปริมาณน้ำฝน

ปริมาตรของแบบจำลองเท่ากับ 0.2127 ลูกบาศก์เมตร ใช้ตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่ กำหนดค่าความชื้นประมาณ 18% ใช้แบบจำลองมวลดินที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ และ 18.34 kN/m³ สำหรับสถานการณ์ที่ฝนตก 4 ระดับ ระบบน้ำฝนใช้หัวพ่นหมอกเพื่อให้น้ำฝนกระจายตัวทั่วพื้นที่และสามารถควบคุมปริมาณความเข้มของน้ำฝนได้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดดินถล่มเนื่องจากฝนตกในปริมาณที่ดินไม่สามารถอุ้มน้ำได้

3.3) การวัดค่าการเคลื่อนตัวและลักษณะดินถล่ม

แบบจำลองจะถูกรวบรวมชุด 5 แถว บริเวณด้านบนบนและด้านหน้าของดินลาดชัน โดยวางห่างกัน 10 เซนติเมตร และวางแบบสลับฟันปลาในแต่ละแถว เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของหมุดทั้งในแนวระนาบ และแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 6 การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของมวลดินแต่ละจุดคือตั้งแต่ช่วงขณะที่เกิดฝนตก และช่วงที่หลังฝนหยุดตก โดยเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวทุก ๆ 30 นาที และช่วงระยะ 3 ชั่วโมง จนครบระยะเวลา 13 ชั่วโมงนับตั้งแต่เริ่มปล่อยน้ำฝนพร้อมทั้งตั้งกล้องบันทึกภาพวิดีโอ ซึ่งในการศึกษาการเกิดดินถล่มในไต้หวัน จะใช้สถิติ Descriptive และ Time Series Analysis พบว่า 80% ของดินถล่มทั้งหมดเกิดภายใน 10 ชั่วโมงหลังฝนหยุดตก โดยเฉพาะในพื้นที่ลาดชันสูงที่มีฝนตกหนักมาก่อนหน้า [26] แสดงถึงพฤติกรรมมวลดินมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องหลังฝนตก ซึ่งอาจเป็นพฤติกรรมการคืบของดิน



รูปที่ 6 : การกำหนดตำแหน่งอ้างอิงเพื่อเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัว

การวิเคราะห์ปริมาณดินถล่มของแบบจำลอง จะเป็นรูปแบบ
การพังทลายรูปโค้ง ในการคำนวณค่าระยะ X , Y จุดศูนย์กลาง
ของส่วนโค้ง จากระยะรอยแตกแบบดึง (Tension Crack: b) ทำ

การวัดระยะรอยแยกดินที่ปรากฏบนแบบจำลองดินลาดชัน โดยใช้จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งที่เกิดการวิบัติ [27] และตำแหน่งการยุบตัวในแนวตั้งของพื้นผิวด้านบนของแบบจำลอง นำไปขึ้นรูป 3 มิติ เพื่อใช้หาปริมาตรดินที่เกิดการถล่มจากน้ำฝนระดับต่าง ๆ

3.4) การประมาณการอัตราการถล่มของมวลดิน

การคำนวณปริมาตรดินถล่ม นำค่าปริมาตรที่เกิดดินถล่มมาเปรียบเทียบกับปริมาตรเดิมของแบบจำลองมวลดินลาดชัน จะได้ค่า V ซึ่งหมายถึงอัตราการพังทลาย ตามสมการ 3

$$V = \frac{V_i}{V_0} \quad (3)$$

โดยที่ V_i คือ ปริมาตรที่เกิดดินถล่ม (m^3)

V_0 คือ ปริมาตรเดิมก่อนเกิดดินถล่ม (m^3)

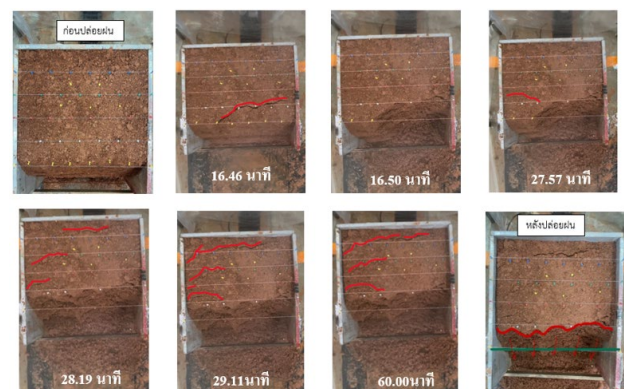
คำนวณค่า d_e ความเข้มของปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อดินถล่ม (effective rainfall depth) และคำนวณค่า R ซึ่งหมายถึงค่าความรุนแรงของอัตราดินถล่มที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน หลังจากนั้นจึงนำมาพัฒนาตารางดัชนีเตือนภัยล่วงหน้าดินถล่มที่เกิดจากปริมาณน้ำฝนและระดับความรุนแรงของดินถล่มที่เกิดขึ้น [15]

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) พฤติกรรมของดินถล่มเมื่อเกิดฝนตก

จากการบันทึกพฤติกรรมแบบจำลองมวลดินลาดชัน โดยติดตั้งกล้องบันทึกวิดีโอและวัดระยะการเคลื่อนตัวของหมุดอ้างอิง เมื่อปล่อยน้ำฝนที่ระดับต่างกันพบว่า ลักษณะการเกิดดินถล่มของแบบจำลองดินลาดชันทั้ง 2 ชนิด พบว่า ดินเดิมบริเวณข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m^3 เมื่อมีฝนตกลงมาปริมาณตั้งแต่ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สังเกตได้ว่ามีน้ำซึมออกบริเวณด้านหน้าของมวลดินลาดชัน และเกิดรอยแยกดินบริเวณด้านบนเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และใช้เวลามากกว่า 10 นาที ดังรูปที่ 7 จากนั้นจึงเกิดดินถล่มบริเวณส่วนขอบด้านบนของแบบจำลองก่อน และเมื่อมีฝนตกต่อเนื่องด้านล่างจะไม่เกิดการถล่ม กระบวนการนี้เรียกว่า “Slow Retrogressive Crest Sliding” เมื่อทดสอบในแบบจำลองที่ปล่อยระดับปริมาณน้ำฝนมากขึ้นพบว่า ปรากฏส่วนที่ดินถล่มเป็นบริเวณที่ขอบด้านบนถึงส่วนล่างของแบบจำลอง โดยมวลดินลาดชันจะค่อย ๆ ทรุดกระจายตัวอย่างต่อเนื่องไปถึงส่วนกลาง จนทำให้เกิดความสมดุลใหม่ กระบวนการนี้เรียกว่า “Multiple Retrogressive Sliding”

สำหรับดินบดอัดไหลทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m^3 จะเกิดดินถล่มที่ระดับปริมาณน้ำฝน 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป มีการสะสมของน้ำในดินเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่พบการซึมผ่านของน้ำด้านหน้าดินลาดชันน้อย แบบจำลองเกิดรอยแยกด้านบนและเกิดการถล่มอย่างรวดเร็วทันทีทันใด เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 44 นาที ส่วนที่เหลืออยู่จะถูกชะล้างโดยฝนที่ตกหนัก กระบวนการนี้เรียกว่า “Suddenly Diffusive Flow Sliding as a Whole” [28] ดังรูปที่ 8

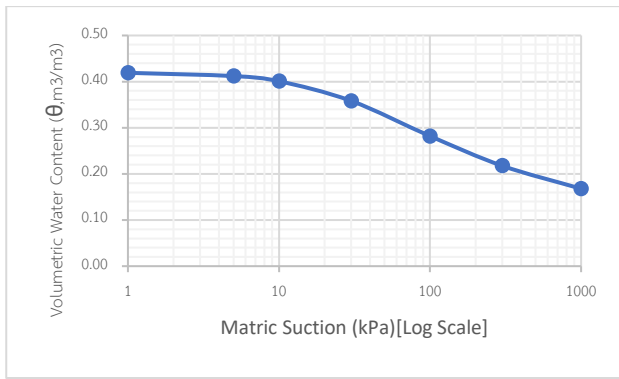


รูปที่ 7 : การพังทลายของแบบจำลองมวลดินเดิมที่หน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m^3 ที่ระดับน้ำฝน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 8 : การพังทลายของแบบจำลองมวลดินบดอัดที่หน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m^3 ระดับน้ำฝน 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำสำหรับแบบจำลองนี้โดยใช้สมการ Van Genuchten สำหรับดินชนิด ดินเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน และการทดสอบค่า Compaction Test ในห้องปฏิบัติการ แสดงอัตลักษณ์น้ำในดิน (soil water retention curve) สะท้อนพฤติกรรมการคายน้ำของดิน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 : กราฟแสดงอัตลักษณ์น้ำในดิน (SWRC)

กราฟ SWRC ของดินเหนียวปนทรายมีลักษณะโค้งงอลงชัดเจน (concave downward) บ่งบอกว่าดินอุ้มน้ำได้มากเมื่อแรงดูดน้ำ (matric suction) ยังต่ำ แต่เมื่อแรงดูดเพิ่มขึ้น ความชื้นโดยปริมาตรจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมดินไม่อิ่มตัวทั่วไป ในขั้นแรก น้ำจะถูกกักอยู่ในรูพรุนขนาดใหญ่จนกระทั่งเกิดแรงดูดเล็ก ๆ (air entry value) แล้วจึงเริ่มปล่อยน้ำออก เมื่อแรงดูดผ่านช่วง 10–100 kPa ดินจะปล่อยน้ำได้เร็วที่สุดสะท้อนถึงการระบายออกของรูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก ก่อนที่แรงดูดจะสูงขึ้นจนเหลือเพียงน้ำตกค้างในรูพรุนจิ๋ว θ_r Residual Water Content ซึ่งแทบไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป

ในเชิงกลศาสตร์ของดิน ค่าความชื้นอิ่มตัว (θ_s) ประมาณ $0.42 \text{ m}^3/\text{m}^3$ บ่งชี้ว่าดินยังสามารถรับน้ำได้มากหลังฝนตกแทรกเข้าสู่พื้นผิว และค่าความชื้นตกค้าง (θ_r) ประมาณ $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ บ่งชี้ว่าดินยังเก็บน้ำได้แม้แรงดูดสูง การรู้ช่วง Field Capacity ($\theta \approx 0.35\text{--}0.40$) ช่วยให้คาดการณ์จังหวะที่แรงดันน้ำในรูพรุน (u) จะพุ่งขึ้น ลดแรงเฉือนสุทธิและนำไปสู่การเกิดดินถล่ม ส่วนช่วง Drainage Zone (10–100 kPa) เป็นช่วงวิกฤตที่หากดินถูกเพิ่มน้ำเข้าสู่บริเวณนี้ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างอย่างรวดเร็ว

ดังนั้น กราฟ SWRC ช่วยอธิบายแบบจำลองฝนตกว่า ดินที่มีหน่วยน้ำหนักเบาจะถล่มเมื่อมีปริมาณฝนตกเข้มข้นเพิ่มเป็น 220–270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดินจะลด Matric Suction ลงสู่ช่วงนี้ภายใน 8–10 นาที เมื่อแรงดูดลดลงเข้าสู่ช่วง Transition Zone ขณะที่ดินที่มีหน่วยน้ำหนักมากต้องใช้เวลานานกว่าในการสะสมแรงดันรูพรุนให้ถึงระดับวิกฤตก่อนจะสั่นไหวออกไป แม้ปริมาณน้ำฝนสูงถึง 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะใช้เวลาถึง 44 นาทีจึงถล่ม เพราะต้องรอให้ Matric Suction ลดผ่านช่วง Transition Zone จึงเข้าสู่สภาวะดินถล่มจริง

จากการเก็บบันทึกและวิเคราะห์ลักษณะดินถล่มของแบบจำลองมวลดิน โดยที่ดินเดิมข้างทางมีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m^3 และดินบดอัดไหล่ทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m^3 ทดสอบภายใต้ปริมาณน้ำฝนแตกต่างกัน ทั้งหมด 8 แบบจำลอง สามารถจำแนกลักษณะพฤติกรรมดินถล่มของดินลาดชัน ออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

4.1.1) เกิดการถล่มบริเวณด้านหน้าดินลาดชันที่ชะงักอย่างช้า ๆ ผลกระทบของฝนที่ตกต่อเนื่องไม่ได้ทำให้เกิดดินถล่มเพิ่มเติมนวลดินบางส่วนด้านบนไหลลงไปยังด้านล่างช้าๆ เรียกว่า “การเกิดดินถล่มอย่างช้าๆ บางส่วนของดินลาดชัน”

4.1.2) เกิดการถล่มบริเวณส่วนกลางของดินลาดชัน มีการไหลในแต่ละส่วนด้านบน เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ห่างกัน ลักษณะพฤติกรรมดินถล่มนี้เรียกว่า “การเกิดดินถล่มหลายครั้งอย่างต่อเนื่อง”

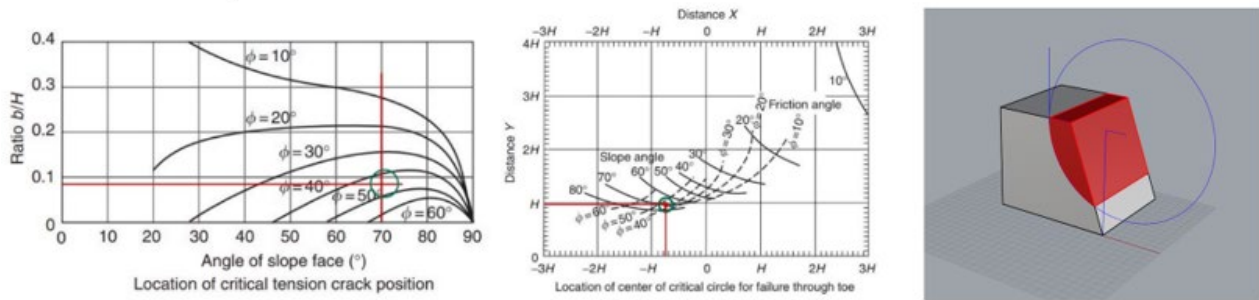
4.1.3) เกิดการถล่มบริเวณส่วนกลางของดินลาดชันและต่อเนื่อง เกิดการไหลตั้งแต่หมดแถวที่ 3 การถล่มเกิดขึ้นในแต่ละส่วนในช่วงเวลาที่ห่างกันและต่อเนื่อง ลักษณะพฤติกรรมนี้เรียกว่า “การเกิดดินถล่มหลายครั้งอย่างต่อเนื่อง”

4.1.4) เกิดการถล่มบริเวณส่วนกลางของดินลาดชันและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการสะสมตัวของแรงภายใน ทำให้มีการเลื่อนถล่มของมวลดินอย่างรวดเร็วและมีการไหลอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่ยังมีฝนตกระยะเวลานึง

ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของดินลาดชัน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มเส้นทางหลวง 1096 อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ โดยดินเดิมบริเวณข้างทางที่มักจะไหลลงมาปิดทับเส้นทางและดินบดอัดไหล่ทางมักจะทรุดลงเหวรวมถึงบางส่วนของถนนอีกด้วย

4.2) การวิเคราะห์พฤติกรรมดินถล่มเชิงสถิติและการประเมินความเสี่ยง

ปริมาณดินที่เกิดดินถล่ม ได้จากการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของแต่ละหมุดในแนวระดับ นำไปสร้างแบบจำลองหลังการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 10 โดยจำลองการถล่มของมวลดินรูปแบบพังทลายรูปโค้ง จากระยะรอยแตกแบบตึง ใช้ชุดแผนภูมิประกอบเพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในและระยะจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งที่เกิดดินถล่ม X และ Y ใช้ในการคำนวณประมาณการปริมาตรของดินที่ถล่มหลังฝนตก



รูปที่ 10 : การหาค่าระยะ X และระยะ Y และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาปริมาตรดินถล่ม

จากการศึกษาพบว่า บริเวณด้านบนของแบบจำลอง หมดแถวที่ 3-5 เมื่อมวลดินเริ่มได้รับน้ำฝนในแต่ละระดับที่ปริมาณความเข้มข้นสูงขึ้น จะเกิดรอยแยกถึงบริเวณด้านบนและลึกเข้ามาในมวลดินมากขึ้น ทำให้ปริมาตรมวลดินที่เกิดถล่มเพิ่มมากขึ้นตามระดับน้ำฝนที่เพิ่มขึ้น ก่อนมวลดินถล่มตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งสามารถนำการบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อหาอัตราการเคลื่อนตัวของดินลาดชันตั้งแต่เกิดรอยแยกถึงจนกระทั่งเกิดดินถล่ม ซึ่งสามารถนำไปศึกษาพฤติกรรมการคืบตัวของมวลดินได้อีกด้วย

ในการทดลองจะมีความแตกต่างของระดับปริมาณน้ำฝน คือ 100 160 220 และ 270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ต่อแบบจำลองมวลดินทั้ง 2 แบบ เพื่อสังเกตพฤติกรรมและเวลาที่เกิดดินถล่มที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ระยะเวลาการพังทลายของแบบจำลอง

ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อ ชั่วโมง)	เวลาที่เกิดดินถล่ม (นาท)	
	มวลดินเดิม หน่วย น้ำหนัก 15.30 kN/m ³	มวลดินบดอัดใหม่ ทาง 18.34 kN/m ³
100	16.50	ไม่เกิดการถล่ม
160	14.03	ไม่เกิดการถล่ม
220	10.04	45.27
270	8.16	42.34

แบบจำลองมวลดินทั้ง 2 หน่วยน้ำหนัก มีความสัมพันธ์แบบยกกำลังสอง (power law) ของปริมาณระดับน้ำฝนกับระยะเวลาที่เกิดดินถล่ม ดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า D ลดลงเมื่อปริมาณฝนเพิ่มขึ้น โดยที่ดินเดิมข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ มีการลดลงของเวลาที่เกิดดินถล่มมากกว่าที่ดินที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m³ ค่าแนวโน้มระยะเวลาที่เกิดดินถล่มมีความ

สัมพันธ์แบบผกผัน (Inverse Relationship) ระหว่าง D และ I ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

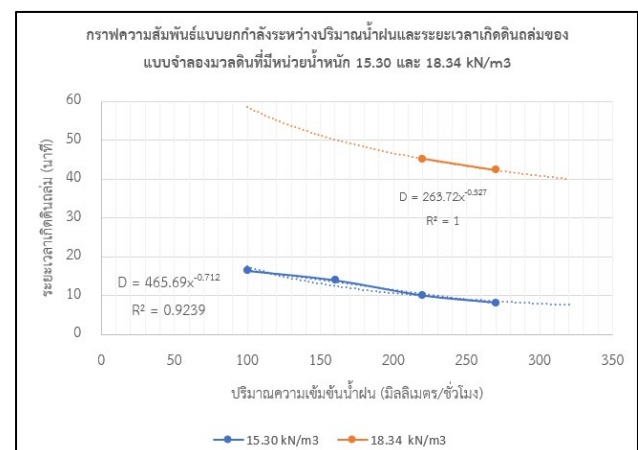
$$D = 465.69I^{-0.712} \quad (4)$$

$$D = 263.72I^{-0.327} \quad (5)$$

โดยที่ D คือ ระยะเวลา

I คือ ปริมาณน้ำฝน

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแบบจำลองสามารถประมาณการระยะเวลาการเกิดดินถล่มภายใต้ปริมาณฝนความที่มีความเข้มข้นระดับต่างๆ ได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์กำลังสอง (R^2) เข้าใกล้ 1 สะท้อนว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลทดลอง และสามารถนำไปใช้ได้กับทั้งมวลดินข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ และดินบดอัดที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m³ ในสถานการณ์ที่มวลดินอิ่มน้ำในฤดูฝน



รูปที่ 11 : ความสัมพันธ์แบบยกกำลังระหว่างปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) และระยะเวลาเกิดดินถล่ม (D นาที่)

4.3) การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีดัชนีเตือนภัยล่วงหน้า

ในการประเมินดินถล่มของแบบจำลอง ค่า V (อัตราดินถล่ม) $|T|$ (เวลาที่เกิดดินถล่ม) de (ปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อดินถล่ม) และ R (ความรุนแรงของอัตราดินถล่มที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน) ซึ่งใช้สมการที่ (1-4) ในการคำนวณ แสดงในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 : การประเมินดินถล่มที่หน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)			
	100	160	220	270
V	0.07	0.0834	0.132	0.1408
$ T $	16.50	14.03	10.04	8.16
De	0.0042	0.0059	0.013	0.017
R	0.246	0.345	0.762	1

ตารางที่ 5 : การประเมินดินถล่มที่หน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m³

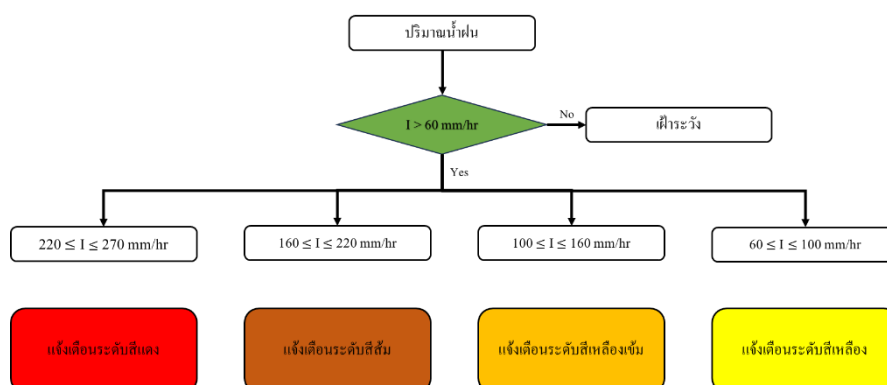
สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)			
	100	160	220	270
V	-	-	0.0834	0.116
$ T $	-	-	45.27	42.34
De	-	-	0.0020	0.0027
R	-	-	0.72	1

จากตารางแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำฝนที่สูงขึ้น ทำให้ดินถล่มเร็วขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักวิศวกรรมปฐพีเมื่อความอิ่มตัวของดิน (saturation) เพิ่มขึ้น จะเกิดการลดแรงเฉือนของดิน (shear strength) โดยที่แรงดันน้ำในรูพรุน (pore water pressure) ในกรณีมวลดินอิ่มตัวใช้สมการที่ 6

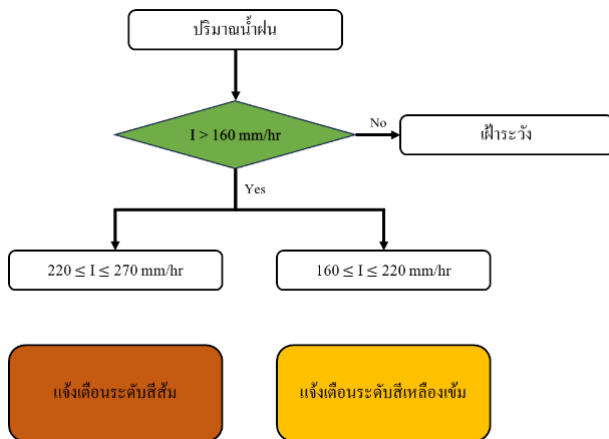
$$u = g_w \cdot h \quad (6)$$

แรงดันน้ำของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 5.89 kPa เท่ากันทั้ง 2 แบบจำลอง แต่ค่าแรงระหว่างการไหลของน้ำ (seepage force) ภายในมวลดินที่มีหน่วยน้ำหนักต่างกันทำให้พฤติกรรมดินถล่มของแบบจำลองแตกต่างกัน ซึ่งมีความสำคัญมากในการอธิบายกระบวนการที่ทำให้ดินสูญเสียเสถียรภาพและนำไปสู่ดินถล่ม โดยที่แรงซึมน้ำเป็นผลมาจากการไหลของน้ำผ่านรูพรุนในมวลดินมีแรงกระทำต่อเม็ดดินโดยตรงและอาจช่วยผลักดันให้หลุดจากกันได้ มวลดินที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ จะมีอัตราส่วนแรงการไหลน้ำต่อน้ำหนักดินเท่ากับ 64% ในขณะที่แบบจำลองมวลดินที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m³ จะมีค่า 53% ทำให้แบบจำลองมวลดินเดิมข้างทางเป็นดินหลวมมีแนวโน้มจะสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวและเกิดดินถล่มสูงกว่า เนื่องจากความต้านทานมีน้อยกว่า ในขณะที่ดินบดอัดแม้มีความต้านทานสูงหากยังมีปริมาณฝนตกที่มากขึ้นจะยังคงมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อถึงจุดวิกฤตแล้วก็จะเกิดการถล่มอย่างรวดเร็ว [29] นอกจากปริมาณน้ำฝนและหน่วยน้ำหนักดินมีผลต่อระยะเวลาและความรุนแรงของดินถล่มแล้ว ลักษณะพฤติกรรมของมวลดินก่อนเกิดดินถล่มยังแตกต่างกันอีกด้วย

ในการวิเคราะห์หาระดับความรุนแรง (R) ของอัตราดินถล่มโดยใช้ปัจจัยของอัตราดินถล่ม เวลาการเกิดดินถล่มและปริมาณน้ำฝน โดยวิเคราะห์ได้ว่า ค่า (R) จะอยู่ระหว่าง 0-1 โดยสอดคล้องกับปริมาณของฝนที่ I : 100-270 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ จึงตั้งระดับการเตือนเป็นสีจากปริมาณน้ำฝนที่สอดคล้องกัน ดังรูปที่ 12 สำหรับดินเดิมข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ และรูปที่ 13 สำหรับดินบดอัดที่ความหนาแน่น 18.34 kN/m³ โดยระดับการเตือนล่วงหน้าและลักษณะดินถล่มที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลอง



รูปที่ 12 : ระบบเตือนภัยล่วงหน้าดินถล่มของมวลดินเดิมข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³



รูปที่ 13 : ระบบเตือนภัยล่วงหน้าดินถล่มของมวลดินบดอัดไหล่ทาง
ที่หน่วยน้ำหนักดิน 18.34 kN/m³

นอกจากนี้การจำแนกลักษณะพฤติกรรมการเกิดดินถล่มที่ได้จากแบบจำลอง สามารถนำข้อมูลมาจำแนกเพื่อสร้างตารางดัชนีระบบเตือนภัยดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝนได้ ค่า R (อัตราความรุนแรงของดินถล่ม) ตั้งแต่ 0–1 โดยที่มวลดินเดิมข้างทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ ควรเฝ้าระวังเมื่อมีระดับฝนตกตั้งแต่ 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และมวลดินบดอัดไหล่ทางที่หน่วยความหนาแน่น 18.34 kN/m³ ควรเฝ้าระวังเมื่อมีฝนตกตั้งแต่ 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เป็นต้นไป

การศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองมวลดินที่ใช้ได้คำนึงถึงปัจจัยที่จะทำให้เกิดดินถล่ม 2 บริเวณ ที่มักจะเกิดขึ้นบนเส้นทางหลวงหมายเลข 1096 อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ถนนถูกตัดผ่านภูเขาสูงชันและมีการออกแบบพิจารณาตามภูมิประเทศทำให้มีความลาดชันของดิน 70 องศา ดินเดิมบริเวณข้างทางที่ถูกตัดผ่านมีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ ควรเฝ้าระวัง (yellow alert) ให้เจ้าหน้าที่ตรวจสอบพื้นที่ หากฝนเกิน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ระดับเตือนภัย (orange alert) เตรียมอพยพหรือปิดถนนเมื่อฝนเกิน 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และระดับวิกฤต (red alert) มากกว่า 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สั่งปิดเส้นทางทันทีและแจ้งเตือนประชาชนในพื้นที่เสี่ยง ในขณะที่ดินที่ถูกบดอัดเป็นไหล่ทาง มีหน่วยน้ำหนักวัดได้ 18.34 kN/m³ เมื่อปริมาณน้ำฝนมากกว่า 220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะเป็นระดับเตือนภัย เตรียมอพยพหรือปิดถนน เนื่องจากมีพฤติกรรมดินถล่มเป็นแบบดินถล่มอย่างฉับพลันบริเวณหน้าความลาดชัน ดินทั้ง 2 แบบ ได้จำแนกลักษณะรูปแบบของดินถล่มสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน ดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 : ดัชนีเตือนภัยดินถล่ม หน่วยน้ำหนักมวลดิน 15.30 kN/m³

ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	ระดับความ รุนแรง	รูปแบบของดินถล่ม
$I \geq 270$	1	ดินถล่มจะเกิดขึ้นถึง ส่วนกลาง มีอย่างต่อเนื่อง และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
$220 \leq I \leq 270$	0.76–1	เกิดดินถล่มหลายครั้งอย่างต่อเนื่อง
$160 \leq I \leq 220$	0.35–0.76	เกิดดินถล่มหลายครั้ง แต่ไม่ ต่อเนื่อง
$100 \leq I \leq 160$	0.25–0.35	ดินถล่มบริเวณด้านหน้าของ ความลาดชันที่ละเอียด ๆ
$60 \leq I \leq 100$	0–0.25	การสะสมตัวของน้ำในดินก่อน เกิดดินถล่ม

ตารางที่ 7 : ดัชนีเตือนภัยดินถล่ม หน่วยน้ำหนักมวลดิน 18.34 kN/m³

ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	ระดับความ รุนแรง	รูปแบบของดินถล่ม
$I \geq 270$	1	การพังทลายอย่างฉับพลันถึง ส่วนกลางของความลาดชัน
$220 \leq I \leq 270$	0.72–1	ดินถล่มอย่างฉับพลันบริเวณ หน้าความลาดชัน
$160 \leq I \leq 220$	0–0.72	เกิดการสะสมตัวของน้ำในดิน จนทำให้เกิดการพังทลาย บริเวณหน้าความลาดชัน
$100 \leq I \leq 160$	0	การสะสมตัวของน้ำในดินก่อน เกิดการพังทลาย

5) สรุปผล

จากการศึกษาแบบจำลองมวลดินในท้องปฏิบัติการ โดยใช้ดินที่มีหน่วยน้ำหนัก 15.30 kN/m³ สำหรับการจำลองดินเดิมบริเวณข้างทางที่ถูกถนนตัดผ่าน และดินบดอัดไหล่ทางที่มีหน่วยน้ำหนัก 18.34 kN/m³ พบว่ามีขีดจำกัดปริมาณน้ำฝนเพื่อเฝ้าระวังการเกิดดินถล่มที่ 60 และ 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับการจัดทำระดับการแจ้งเตือน (warning levels) ควรอาศัยเครือข่ายสถานีวัดฝนอัตโนมัติที่ครอบคลุมพื้นที่ภูเขาอย่างเพียงพอเพื่อให้ได้ข้อมูลฝนแบบเรียลไทม์คล้ายกับกรณีของฮ่องกงที่มีสถานีวัดฝนกว่า 120 สถานีให้ข้อมูลแก่ระบบเตือนดินถล่มตลอดเวลา [17], [30]

การศึกษาแบบจำลองดินถล่มยังสามารถจำแนกพฤติกรรมลักษณะดินถล่มได้ 4 ลักษณะ ตั้งแต่การถล่มช้า ๆ เฉพาะขอบด้านบนจนถึงการถล่มอย่างรวดเร็วทั้งหมด ซึ่งช่วยพัฒนาเกณฑ์

เตือนภัยที่สัมพันธ์กับปริมาณฝน คือ ระดับสีเหลือง ที่ปริมาณน้ำฝน $>60 \leq 100$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ระดับสีเหลืองเข้มที่ปริมาณน้ำฝน $>100 \leq 160$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ระดับสีส้มปริมาณน้ำฝน $>160 \leq 220$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และระดับสีแดงปริมาณน้ำฝน >220 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สำหรับมวลดินหลวมข้างทางซึ่งมักจะเกิดดินถล่มลงมาปิดทับเส้นทางในพื้นที่กรณีศึกษา

ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าปริมาณน้ำฝนระดับ 30–60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงส่งผลต่อการถล่มของมวลดินได้ และสัดส่วนแรงซึมผ่านของน้ำและน้ำหนักของดินทั้ง 2 หน่วยน้ำหนักมีมากกว่าร้อยละ 50% เนื่องจากการสะสมความชื้นในดินตามระยะเวลาส่งผลต่อการถล่มมวลดิน [15], [18] นำไปสู่การวางแผนจัดระบายน้ำและกำแพงกันดินให้เหมาะสมกับปริมาณฝนที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นได้ เพื่อป้องกันน้ำฝนสะสมจนทำให้ลาดดินอึดตัวเกินกว่าจุดวิกฤต นอกจากนี้การจัดการพื้นที่ต้นน้ำ เช่น การปลูกป่าและรักษาหน้าดิน ก็เป็นส่วนหนึ่งของแผนระยะยาวที่ช่วยลดความรุนแรงของน้ำหลากและชะลอการซึมของน้ำลงดิน ลดโอกาสเกิดดินถล่มในพื้นที่ลาดชัน

6) ข้อเสนอแนะ

หน่วยงานรัฐควรเร่งติดตั้งระบบวัดฝนและเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดิน พร้อมจัดสรรงบประมาณสำหรับงานป้องกันเชิงโครงสร้าง และการเสริมความเข้าใจแก่ประชาชนในพื้นที่ นอกจากนี้การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาแบบจำลองผสมผสานทั้งแบบกายภาพและด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลฝนและใช้เซ็นเซอร์จากภาคสนาม พร้อมเชื่อมโยงกับเทคโนโลยี Remote Sensing เช่น InSAR หรือ LiDAR เพื่อเฝ้าระวังแบบพื้นที่ขนาดใหญ่ และทดลองจำลองการถล่มในขนาดที่ใหญ่ขึ้นเพื่อทดสอบสมมติฐานเชิงพลศาสตร์ของดิน [16], [31]

ทั้งนี้การศึกษาในห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมตัวแปรได้ดี แต่ก็มีข้อจำกัดด้านการรบกวนและความซับซ้อนของภูมิประเทศจริง [32] โดยการศึกษาเน้นจำลองฝนระยะสั้นในขนาดจำกัด ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมสภาพแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยร่วมหลายด้าน เช่น ฝนสะสมหลายวัน รากพืช หรือแรงกระทำจากแผ่นดินไหว [13], [14] งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางกายภาพสามารถให้ข้อมูลเชิงกลไกที่นำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการพัฒนาเกณฑ์เตือนภัยดินถล่ม เกณฑ์ฝนที่ได้ (60 และ 160 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) สามารถนำไปใช้ในการบริหารจัดการพื้นที่เสี่ยงและการ

วางแผนเชิงนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการศึกษาและการสนับสนุนด้วยข้อมูลสนาม เทคโนโลยี และบูรณาการข้ามหน่วยงาน

REFERENCES

- [1] F. Guzzetti, A. C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, and K. T. Chang, "Landslide inventory maps: new tools for an old problem," *Earth-Sci. Rev.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 42–66, 2012.
- [2] R. Gracheva and A. Golyeva, "Landslides in mountain regions: hazards, resources and information," in *Geophysical Hazards*, T. Beer, Ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010, pp. 249–260.
- [3] J. Benoit *et al.*, "The Oso, Washington, USA landslide: Lessons learned through field reconnaissance and data collection," in *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2016, pp. 3167–3174. doi: 10.3233/978-1-61499-603-3-3167.
- [4] K. Ho, S. Lacasse, and L. Picarelli, Eds., *Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [5] R. A. Yuniawan *et al.*, "Revised rainfall threshold in the Indonesian landslide early warning system," *Geosciences*, vol. 12, 2022, Art. no. 129, doi: 10.3390/geosciences12030129.
- [6] K. Intarat, P. Yoomee, A. Hussadin, and W. Lamprom, "Assessment of landslide susceptibility in the intermontane Basin Area of Northern Thailand," *Environ. Nat. Resour. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 158–170, 2024.
- [7] C. Dechkamfoo, *et al.*, "Impact of rainfall-induced landslide susceptibility risk on mountain roadside in Northern Thailand," *Infrastructures*, vol. 7, no. 2, 2022, Art. no. 17, doi: 10.3390/infrastructures7020017.
- [8] Naewna. "Avoid the route! 'Chiang Mai' landslide blocks traffic," (in Thai), NAEWNANEWS.com. <https://www.naewna.com/local/827336> (accessed Sep. 6, 2024).
- [9] DPM Reporter, "A landslide has blocked Highway 1096," (in Thai), 2022. [Online]. Available: <https://dpmreporter.dhs.go.th/portal/disaster-news/3659>
- [10] Chiang Mai News. "Landslide blocks Mae Rim–Samoeng road near the botanical garden," (in Thai), CHIANGMAI NEWS.co.th. <https://www.chiangmainews.co.th/disaster/2731955/> (accessed Sep. 13, 2022).



- [11] P. Yongsiri, P. Soyotong, W. Laongmanee, and P. Uthaisiri, "Development of a landslide risk area display system by using the geospatial technology with daily rainfall data via the internet network in the Northern region of Thailand," *Int. J. Agricultural Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 1953–1968, 2023.
- [12] S. Zhang et al., "Model test study on the hydrological mechanisms and early warning thresholds for loess fill slope failure induced by rainfall," *Eng. Geol.*, vol. 258, 2019, Art. no. 105135.
- [13] S. Phumcha-em, B. Kunsuwan, and W. Mairiang, "3-D seepage modeling for analyzing unsaturated slope stability," *Naresuan Univ. Eng. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 73–84, 2017.
- [14] N. Casagli et al., "Monitoring and early warning systems: Applications and perspectives," in *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*, B. Šarić, K. Sassa, P. Canuti, and Y. Yin, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 1–21.
- [15] Q. Li, D. Huang, S. Pei, J. Qiao, and M. Wang, "Using physical model experiments for hazards assessment of rainfall-induced debris landslides," *J. Earth Sci.*, vol. 32, pp. 1113–1128, 2021.
- [16] R. I. Spiekermann, F. V. Zadelhoff, J. Schindler, H. Smith, C. Phillips, and M. Schwarz, "Comparing physical and statistical landslide susceptibility models at the scale of individual trees," *Geomorphology*, vol. 440, 2023, Art. no. 108870.
- [17] Y. Qin, G. Yang, K. Lu, Q. Sun, J. Xie, and Y. Wu "Performance evaluation of five GIS-based models for landslide susceptibility prediction and mapping: A case study of Kaiyang county, China," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, 2021, Art. no. 6441.
- [18] P. Sun, H. Wang, G. Wang, R. Li, Z. Zhang, and X. Huo, "Field model experiments and numerical analysis of rainfall-induced shallow loess landslides," *Eng. Geo.*, vol. 295, Dec. 2021, Art. no. 106411.
- [19] S. Soralump, "Rainfall-Triggered Landslide: from research to mitigation practice in Thailand", *Geotechnical Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 39–44, 2024.
- [20] A. Chinkulkijniwat, R. Salee, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, and M. Hoy, "Landslide rainfall threshold for landslide warning in Northern Thailand," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 13, no. 1, pp. 2425–2441, 2022.
- [21] J. Sukpinit, P. Hemwan, and A. Charoenpanyanet, "Landslide susceptibility assessment using frequency ratio method: A case study in Sakad village, Sakad Subdistrict, Pua District, Nan Province," *Burapha Sci. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 1832–1851, 2022.
- [22] Weather Spark. "Climate and average weather year round in Samoeng" [Online]. Available: <https://weatherspark.com/y/112815/Average-Weather-in-Samoeng-Thailand-Year-Round#Figures-Rainfall> (accessed Mar. 7, 2024).
- [24] Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, *Zoning for Geological Management and Mineral Resources of Chiang Mai Province*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: Amarin Printing & Publishing (in Thai), 2015.
- [25] D. C. Wyllie and C. W. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed., New York, NY, USA: Spon Press, 2004.
- [26] Geospatial JS. "Principles of slope design for road and grading works (basic)," BLOGSPOT.com. <https://geomatics-tech.blogspot.com/2013/10/slope-grading.html> (accessed Jul. 1, 2024)
- [27] J.-C. Chen and W.-S. Huang, "Evaluation of rainfall-triggered debris flows under the impact of extreme events: A Chenyulan watershed case study, Taiwan," *Water*, vol. 13, no. 16, 2021, Art. no. 2201.
- [28] Y.-m. Wu, H.-x. Lan, X. Gao, L.-p. Li and Z.-h. Yang, "A simplified physically based coupled rainfall threshold model for triggering landslides," *Eng. Geo.*, vol. 195, pp. 63–69, 2015.
- [29] J. A. Hudson and J. P. Harrison, *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*, New York, NY, USA: Elsevier Science, 1997.
- [30] S. Segoni, L. Piciullo, and S. L. Gariano, "Preface: Landslide early warning systems: Monitoring systems, rainfall thresholds, warning models, performance evaluation and risk perception," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 18, pp. 3179–3186, 2018.
- [31] P. Khiaosalap and P. Tongdenok, "Assessment of landslide hazard applying techniques weighted factor index method and geographic information system in Huai Mae Saroi watershed, Phrae province," in *Proc. 53rd Kasetsart Univ. Annu. Conf.: Sci. Genetic Eng., Architecture and Eng., Agro-Industry, Natural Resour. and Environ.*, Feb. 2015, pp. 1264–1271.
- [32] L. Piciullo, M. Calvello and J. M. Cepeda, "Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides," *Earth-Sci. Rev.*, vol. 179, pp. 228–247, 2018.